

Avaliação da influência da largura das fissuras na evolução da frente de carbonatação



Rui D. Neves¹



Fernando Branco²



Jorge de Brito³

RESUMO

No presente trabalho estudou-se a influência da abertura das fissuras na evolução da frente de carbonatação, através de ensaios de carbonatação acelerada. Para além da variação da abertura das fissuras, entre 0.1 e 1.0 mm, fez-se variar ainda a composição do betão. O trabalho desenvolvido permitiu verificar que o tipo de influência que a abertura das fissuras exerce na evolução da frente de carbonatação é distinta, consoante a gama de variação dessa abertura, e que para fissuras de largura inferior aos limites definidos regulamentarmente essa influência é mínima.

PALAVRAS-CHAVE

Betão; Carbonatação; Durabilidade; Fissuras.

¹ Instituto Politécnico de Setúbal, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, 2839-001 Lavradio, Portugal.
rui.neves@estbarreiro.ips.pt

² Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1049-001 Lisboa, Portugal. fbranco@civil.ist.utl.pt

³ Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1049-001 Lisboa, Portugal. jb@civil.ist.utl.pt

1. INTRODUÇÃO

A corrosão do aço no betão é a causa mais frequente de deterioração das estruturas de betão armado. Inicialmente, o aço no interior do betão encontra-se protegido contra a corrosão por uma película de óxidos passivantes. Essa película é vulnerável à acção do dióxido de carbono e dos iões cloreto que se encontram no meio e que penetram no betão que protege o aço desses elementos. As características da estrutura porosa do betão são determinantes para velocidade de penetração destes agentes. Porém, a existência de fissuras possibilita que a despassivação das armaduras ocorra num espaço de tempo mais curto. As fissuras podem surgir quando o betão ainda se encontra no estado fresco (fissuração plástica), usualmente devido a uma protecção pouco eficiente, ou no betão endurecido, neste caso originadas por cargas ou deformações impostas. Independentemente da sua origem, constituem vias preferenciais de acesso dos agentes agressivos às armaduras, sendo esse acesso mais rápido com o aumento da largura das mesmas.

Estudos efectuados sobre a influência da largura de fissuras na permeabilidade do betão demonstraram que a difusibilidade [1] e a permeação [2] aumentam exponencialmente, com a largura das fissuras. Picandet [3] verificou que a permeabilidade ao ar aumenta exponencialmente com o nível de fendilhação, quando a origem das fendas se deve a estados de compressão. Num estudo conduzido por Reinhardt et al. [4], verificou-se que, para fissuras com largura inferior a 0.03 mm, a permeabilidade do betão a fluidos orgânicos não é afectada. Wang et al. [5] concluíram que fendas com abertura inferior a 0.05 mm têm pouca influência na permeabilidade à água do betão. Por sua vez, Nagaraj e Hearn [6] afirmam que a abertura das fissuras é o parâmetro mais influente na permeabilidade do betão. É nesta perspectiva que a regulamentação existente [7] e futura [8] estabelecem limites para a largura de fendas em função da agressividade do meio ambiente e das consequências associadas à corrosão das armaduras, variando os valores limite indicados entre 0.1 e 0.3 mm. Existem abordagens em que, para além da agressividade do meio, o limite de abertura das fendas também é função do recobrimento das armaduras [9].

No Model Code 90 [10], é referido que existem evidências de que a largura das fissuras influencia a velocidade de despassivação das armaduras mas que, desde que não sejam excedidos valores limites, adequadamente especificados, o risco de corrosão não é, salvo situações particulares (e. g. utilização de sais de degelo), necessariamente aumentado.

De facto, a existência de uma fissura diminui, na zona da sua localização, a espessura de recobrimento. Essa redução será igual à profundidade da fissura. Todavia, no interior da fissura, a concentração do agente agressivo será em princípio inferior à que se verifica na superfície do betão. Essa diferença deve-se às características da difusão do agente agressivo no interior da fenda, que são influenciadas pela largura da fenda, bem como pela sua geometria.

Em geral a abertura das fissuras diminui em profundidade [11]. Em fissuras com esta configuração, a espessura de material carbonatado, medida perpendicularmente aos bordos da fissura, reduz-se em profundidade (Fig. 1). De acordo com Jana e Erun [12], essa espessura anula-se quando se atinge a profundidade máxima da fissura ou um pouco antes desse ponto.

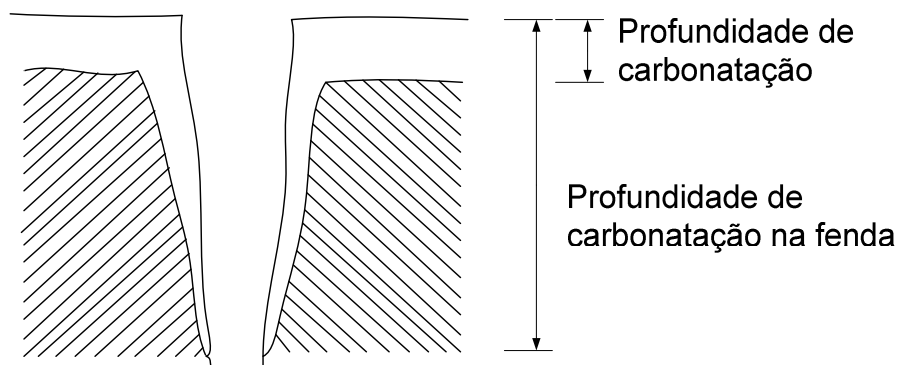


Figura 1. Exemplo de carbonatação numa fissura, adaptado de [13].

Silva [14] verificou experimentalmente que, em fissuras deste tipo, a profundidade de carbonatação ortogonal à parede da fissura medida em dois pontos afastados entre si de 5 mm pode variar do simples para o dobro.

Sullivan-Green [15] e Simas [16] também observaram o efeito de redução da espessura de material carbonatado, medida perpendicularmente aos bordos da fissura, ao longo da profundidade da mesma, embora as fissuras analisadas fossem de abertura constante. Em ambos os casos, as fissuras só dispunham de uma extremidade em contacto com o exterior, ou seja, com a fonte do agente agressivo, neste caso o dióxido de carbono. Assim, a redução é justificada pela diminuição da concentração do dióxido de carbono com a distância à fonte. Nas fissuras cuja abertura se reduz em profundidade, acresce ao último factor a diminuição da difusibilidade do dióxido de carbono com a abertura da fenda.

Nas fissuras que atravessam toda a secção do elemento, a carbonatação ao longo das paredes da fissura tende a ser uniforme [12].

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

No presente trabalho, avaliou-se a profundidade de carbonatação, desenvolvida em condições aceleradas, nos bordos de fissuras de abertura constante que atravessaram a totalidade dos provetes, situação que pretende simular a fendilhação causada por retracção de secagem e por variações sazonais de temperatura. A largura das fissuras estudadas variou entre 0.1 e 1 mm, o que, de acordo com [17], corresponde a fissuras finas, tendo-se utilizado dois betões de classes de resistência distintas.

2.1 Betões

Foram utilizadas duas composições de betão, apresentando-se no Quadro 1 os materiais utilizados, bem como as respectivas dosagens e ainda os principais parâmetros de caracterização.

Quadro 1. Betões utilizados.

<i>Betão</i>	<i>A</i> (C25/30.S3)	<i>B</i> (C40/50.S4)
Areia fina (kg/m ³)	269	235
Areia grossa (kg/m ³)	549	410
Brita 1 (kg/m ³)	454	530
Brita 2 (kg/m ³)	620	510
Cimento II/A-L (kg/m ³)	280	470
Água (l/m ³)	170	197
Adjuvante (l/m ³)	2.24	4.70
A/C	0.61	0.42
Abaixamento (mm)	130	250
fc,7 (MPa)	31.0	50.5
fc,28 (MPa)	38.5	62.5

2.2 Preparação dos provetes

Os provetes utilizados foram cilindros com 150 mm de diâmetro e 50 mm de altura, obtidos por corte de cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Os cilindros iniciais foram conservados nos moldes até 24 horas após a betonagem e em câmara saturada até aos 7 dias, idade em que foram cortados, dando origem aos cilindros finais. Após o corte, os cilindros resultantes foram mantidos durante 3 semanas em sala condicionada com 20 °C de temperatura e 65% de humidade relativa.

Aos 28 dias de idade, procedeu-se à separação de cada provete em duas partes por impacto, transmitido através de um escopro. As duas partes foram reposicionadas, tendo-se controlado o seu afastamento, a abertura da fenda, através da interposição de um número variável de películas plásticas sobrepostas (Fig. 2). Posteriormente, aplicou-se fita adesiva de alumínio na face curva, o que permitiu simultaneamente prevenir a carbonatação nessas superfícies e garantir a manutenção da abertura da fenda durante o ensaio.



Figura 2. Pormenor da preparação de um provete com abertura de fenda de 1 mm.

Concluído este processo, a abertura das fendas foi medida através de observação com lupa de fendas e confirmada por análise de imagem digital.

Quadro 2. Aberturas de fenda utilizadas.

<i>Betão</i>	<i>Abertura de fenda (mm)</i>
A	0.1
	0.3
	0.65
	1.0
B	0.15
	0.3
	0.45

Refira-se que a fenda com abertura de 0.1 mm não foi programada tendo sido detectada somente após a exposição do respectivo provete às condições de carbonatação acelerada. Assim, a sua abertura foi medida somente por observação da fotografia do provete.

2.3 Carbonatação acelerada

A resistência à carbonatação foi determinada aplicando as condições ambientais previstas na especificação LNEC E 391 [18]: 23 ± 3 °C de temperatura, $60 \pm 5\%$ de humidade relativa e $5 \pm 0.1\%$ de dióxido de carbono.

Os provetes fissurados foram colocados na câmara de carbonatação acelerada durante 15 dias. Após a sua saída da câmara, foram partidos por impacto, transmitido através de um escopro, perpendicularmente às fissuras e as superfícies de fractura foram aspergidas com solução alcoólica de fenolftaleína, tendo-se medido a profundidade de carbonatação por observação da reacção corada (Fig. 3).



Figura 3. Medição da profundidade de carbonatação num provete fissurado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 3, apresentam-se as profundidades de carbonatação médias, medidas perpendicularmente à face do provete (C_f) e à parede da fissura (C_f) em cada par betão - abertura de fenda, após 15 dias de exposição.

Quadro 3. Profundidades de carbonatação nas faces expostas (C) e nas paredes das fissuras (C_f).

Betão	A	A	A	A	B	B	B
—	—	—	—	—	—	—	—
Abertura de fenda (mm)	0.1	0.3	0.65	1.0	0.15	0.3	0.45
C (mm)	8.5	9.6	8.5	9.6	1.1	2.4	2.3
C_f (mm)	3.7	3.8	4.7	9.3	0.3	1.0	0.9

Os resultados evidenciam um aumento da espessura de material carbonatado nas fissuras com o aumento da abertura das mesmas.

Observando os valores de C_f para a abertura de fenda de 0.3 mm nos dois betões, verifica-se que o valor para o betão A é superior ao obtido no betão B, o mesmo sucedendo para os valores de C.

Dada a natural influência da composição do betão na profundidade de carbonatação medida perpendicularmente às paredes das fissuras, para tornar possível a comparação dos resultados observados nos dois betões, utilizou-se o quociente entre C_f e C, cujos resultados se encontram no Quadro 4.

Quadro 4. Razão entre as profundidades de carbonatação nas faces expostas (C) e nas paredes das fissuras (C_f).

Betão	A	A	A	A	B	B	B
—	—	—	—	—	—	—	—
Abertura de fenda (mm)	0.1	0.3	0.65	1.0	0.15	0.3	0.45
$\frac{C_f}{C}$	0.44	0.40	0.55	0.97	0.27	0.42	0.39

Na Fig. 4, são representados graficamente os valores do Quadro 4.

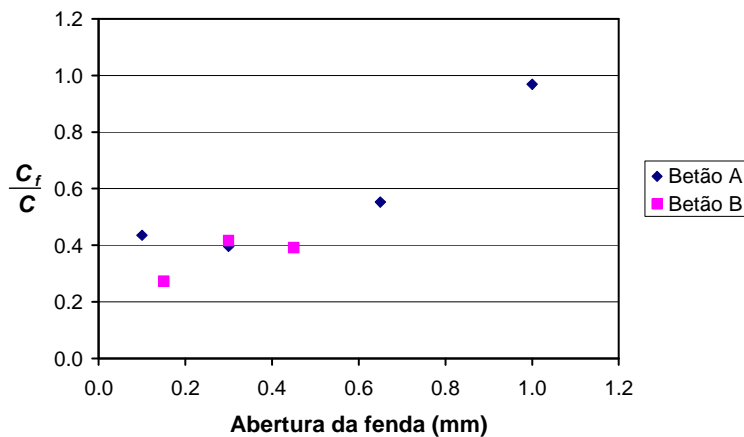


Figura 4. Variação da razão entre as profundidades de carbonatação nas faces expostas e nas paredes das fissuras com a abertura da fenda.

Observando a Fig. 4, verifica-se que o quociente entre C_f e C torna a análise da influência da abertura de fendas na evolução da frente de carbonatação independente do tipo de betão, permitindo assim comparar resultados obtidos em diferentes betões.

O gráfico parece indicar que, para aberturas da ordem de 1 mm ou superiores, a taxa de carbonatação na fissura é idêntica à da superfície do betão. Quando a abertura se reduz para valores próximos de 0.5 mm, a taxa de carbonatação na fissura reduz-se até 40% da verificada na superfície, mantendo-se neste valor para aberturas inferiores.

O valor obtido para a abertura da fenda de 0.15 mm situa-se ligeiramente fora daquilo que é a tendência observada para os restantes pontos, mas deve-se salientar que as profundidades de carbonatação medidas são muito reduzidas, especialmente na perpendicular às paredes da fissura, pelo que os respectivos resultados podem encontrar-se influenciados pela precisão da medição.

De referir que Sullivan-Green [15], apesar de ter procurado validar relações lineares entre a abertura das fendas e a evolução da frente de carbonatação no interior das mesmas, reconhece que existem poucas diferenças nessa evolução para aberturas de fendas entre 0 e 0.5 mm. Admite ainda que a curva de relação entre estes dois factores possa ter a forma de um “S”, esboçando qualitativamente um gráfico em que existem um patamar inferior e um patamar superior, para a evolução da carbonatação nas fissuras, ligados por uma curva de transição. Esse esboço ajusta-se aos resultados obtidos no presente trabalho e apresentados na Fig. 4.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido permitiu constatar que, embora para fissuras de largura inferior aos limites definidos regulamentarmente a influência na evolução da frente de carbonatação seja mínima, não é todavia desprezável.

François e Arliguie [19] afirmam que a evolução da corrosão não é influenciada pela abertura das fendas, desde que esta seja inferior a 0.5mm. Becker [20] refere que somente as fissuras com abertura superior a 0.4 mm dão origem a corrosão. Bertolini et al. [21] indicam que, nas situações em que as fissuras têm abertura inferior a 0.5 mm, não existe qualquer correlação entre a abertura da fissura e o risco de corrosão. Os resultados obtidos no presente trabalho mostram que o valor crítico da abertura de fendas, abaixo do qual a influência na evolução da frente de carbonatação é mínima, se situa próximo destes. Seria interessante avaliar, de forma mais detalhada, a influência de aberturas compreendidas entre 0.4 e 1.0 mm. Tal avaliação permitiria conhecer de forma mais precisa o modo como se faz a transição entre os dois patamares observados na Fig. 4.

A observação da frente de carbonatação nas paredes da fissura permitiu verificar que, tal como avançado por Jana e Erun [12], esta se desenvolve de modo aproximadamente constante em toda a profundidade da fissura quando esta atravessa a totalidade do elemento.

REFERÊNCIAS

- [1] SONG, H.-W. [et al.]. - Predicting carbonation in early-aged cracked concrete. *Cement and Concrete Research* 36. Elsevier, 2006. pp. 979–989
- [2] GERARD, M. [et al.]. - Measured transport in cracked concrete. *RILEM Report 16 - Penetration and Permeability of Concrete: Barriers to Organic and Contaminating Liquids*, EFN Spon, 1997.
- [3] PICANDET, V. - Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons. Université de Nantes, 2001. 233 p. Thèse de Doctorat.
- [4] REINHARDT, H.W. [et al.]. - Cracked and repaired concrete subject to fluid penetration. *Materials & Structures*, 31. RILEM, 1998. pp. 74-83
- [5] WANG, K. [et al.]. - Permeability study of cracked concrete. *Cement and Concrete Research* 27. Elsevier, 1997. pp. 381-393

- [6] NAGARAJ, A.; HEARN, N. - Correlations between stress, strain, crack parameters and permeation characteristics of cementitious systems for durability assessments. International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering. Evanston, 2004. 20 p.
- [7] Regulamento de Estruturas de Betão armado e Pré-esforçado. INCM, 1990. 214 p.
- [8] EN 1992-1-1:2004 - Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1-1. General rules and rules for buildings. CEN, 2004. 225 p.
- [9] RILEM TC-122-MLC - State of the art report on micro-cracking and lifetime of concrete - Part 1. Materials and Structures 29. RILEM, 1996. pp. 3-8
- [10] CEB-FIP Model Code 1990. Thomas Telford, 1993. 437 p.
- [11] BAZANT, Z. [et al.] - Effect of cracking on drying permeability and diffusivity of concrete. ACI Materials Journal 84. ACI, 1987. pp. 351-357
- [12] JANA, D.; ERUN, B. - Carbonation as an indicator of crack age. Concrete International 29. ACI, 2007. pp.39-42
- [13] SCHIESSL, P. - Corrosion of steel in concrete, Report of the Technical Committee 60-CSC RILEM. Chapman and Hall, 1988. 102 p.
- [14] SILVA, V. - Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida. USP, 2007. 281 p. Tese de Doutorado.
- [15] SULLIVAN-GREEN, L. - Effects of crack width on carbonation penetration: Implications for crack-dating. Northwestern University, 2005. 120 p. MSc Thesis.
- [16] SIMAS, M. - Sistemas de protecção de betão face à carbonatação. Instituto Superior Técnico, 2007. 81 p. Dissertação de Mestrado.
- [17] Concrete Society “Non-structural cracks in concrete”, Technical Report 22. Concrete Society, 1992. 48 p.
- [18] E 391 - “Betões. Determinação da resistência à carbonatação”. LNEC, 1993. 2 p.
- [19] FRANÇOIS, R.; ARLIGUIE, G. - Effect of microcracking and cracking on the development of corrosion in reinforced concrete members. Magazine of Concrete Research 51. Thomas Telford, 1999. pp. 143-150
- [20] BECKER, E. - Corrosión de armaduras: Influencia de la calidad del hormigón de recubrimiento. [On line]. 2005. [Consult. 2 Mar. 2009]. Disponível em WWW:<URL: http://www.lomanegra.com.ar/pdf/trabajos/CORROSION_DE_ARMADURAS.pdf >.
- [21] BERTOLINI, L. [et al.] - Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair. Wiley, 2003. 392 p.